

Über das Sehen von Bewegungen und die Theorie des zusammengesetzten Auges.

(Mit 1 Tafel.)

Von Dr. **Sigmund Exner,**

Privatdocenten und Assistenten am physiologischen Institute zu Wien.

(Vorgelegt in der Sitzung am 15. Juli 1875.)

Ich habe in meiner Abhandlung „Einfachste psychische Processe III“ (Pflüger's Archiv, 1875) bei Gelegenheit der „kleinsten Differenz“ zwischen zwei Punkten der Netzhaut einen Versuch angeführt, aus welchem, wie mir scheint, hervorgeht, dass das Erkennen einer Bewegung nicht, wie man bisher glauben musste, auf einer Wahrnehmung, sondern dass es in gewissen Fällen auf unmittelbarer Empfindung beruht. Dass ich mich hierin nicht täusche, will ich versuchen jetzt nachzuweisen.

Dabei stosse ich sogleich auf ein bedeutendes Hinderniss. Wir haben nämlich, obwohl wir im Allgemeinen recht gut wissen, wann wir von Wahrnehmung und wann wir von Empfindung zu sprechen haben, keine gut brauchbare Definition dieser Begriffe. Es geht uns mit dieser, sowie mit der Definition von Thier und Pflanze. Wir haben eine solche, können aber gelegentlich im speciellen Falle doch nicht sagen, ob ein Naturobject ein Thier oder eine Pflanze ist.

Mit denjenigen Begriffsbestimmungen von Empfindung und Wahrnehmung, in welchen das Wort „Seele“ vorkommt, ist für uns nichts anzufangen, weil wir nicht wissen, wo der Autor derselben die Grenze zwischen materiellen Vorgängen in unseren nervösen Apparaten und den immateriellen Vorgängen setzt, welche Vorgänge in uns er noch zu ersteren, welche zu letzteren rechnet.

Es wird also gerechtfertigt sein, wenn wir uns an die Definition halten, welche der Meister der modernen Sinnesphysio-

logie Helmholtz gegeben hat. Dieselbe lautet[1]: „Empfindungen nennen wir die Eindrücke auf unsere Sinne, insofern sie uns als Zustände unseres Körpers (speciell unserer Nervenapparate) zum Bewusstsein kommen; Wahrnehmungen insofern wir uns aus ihnen die Vorstellung äusserer Objecte bilden“.

Auch diese Definition ermöglicht es uns nicht, im speciellen Falle zu sagen, ob wir es mit einer Empfindung oder einer Wahrnehmung zu thun haben. Helmholtz fährt nach der obigen Definition fort: „Wenn wir einen gewissen Schall auffassen, als den Klang einer Violine, so ist dies eine Wahrnehmung, wir schliessen auf die Existenz eines bestimmten Tonwerkzeuges, welches derartige Klänge hervorzubringen pflegt. Wenn wir aber diesen Klang in seine Partialtöne zu zerlegen suchen, so ist dies Sache der reinen Empfindung“. Dabei ist natürlich die Empfindung als das Primäre, die Wahrnehmung als das Secundäre gedacht, denn pag. 427 der physiolog. Optik sagt Helmholtz: „Wir benutzen die Empfindungen, welche Licht in unserem Sehnervenapparate erregt, um uns aus ihnen Vorstellungen ..... zu bilden. Dergleichen Vorstellungen nennen wir Gesichtswahrnehmungen.“

Wenn aber Jemand weder bestrebt noch befähigt ist, die Partialtöne aus dem Klange einer Violine heraus zu hören, so können dieselben keine Empfindung hervorrufen, da sie nicht zum Bewusstsein kommen. Wird dann doch der Klang Gegenstand directer Empfindung, obwohl ihm die eigentlichen Empfindungen nur zu Grunde liegen? Ja es kann sogar der Ton der Violine als solcher erkannt werden, ohne dass die Partialtöne, die doch Gegenstand der primären Empfindung sein sollen, zum Bewusstsein kommen. Es wäre das eine Wahrnehmung ohne Empfindung. Es liessen sich aus anderen Gebieten der Sinnesphysiologie viele Beispiele dieser Art anführen[2], aus welchen hervorgeht, dass bei Festhaltung dieser Definition entweder Wahrnehmungen ohne Empfindungen zugestanden, oder die Noth-

---

[1] Tonempfindungen. 2. Auflage. S. 101.

[2] Beurtheilung der Richtung des Sehens nach dem Muskelgefühl u. d. m. gehört hieher.

wendigkeit des Bewusstwerdens zum Zustandekommen einer Empfindung geläugnet werden müsste [1].

Es müssen also die Eindrücke, die dem Sensorium von den Sinnen her rapportirt und die zum Aufbau einer Wahrnehmung verwendet werden, nicht sämmtlich zum Bewusstsein kommen, d. h. nicht eigentliche Empfindungen sein. Ich weiss in der That nicht, wie im obigen Beispiele geurtheilt werden müsste.

Angenommen, wir hätten uns dahin entschieden, den Klang einer Violine, um dessen Entstehung sich der Beobachter nicht kümmert, und dessen Partialtöne er im Momente nicht hört, obwohl ihn die Aufmerksamkeit in Partialtöne zerlegen kann, als Empfindung zu betrachten, so unterscheidet sich diese Empfindung in ihrem Zustandekommen durch Nichts von der Empfindung des Weiss. Wenn man aber im Stande ist, wie ich dies vor einigen Jahren beschrieben habe [2], das lichtschwache Weiss im Nebel des dunkeln Gesichtsfeldes in die Grundfarben zu zerlegen und so durch die Aufmerksamkeit die einzelnen primären Empfindungen wachzurufen, ist dann das Weiss auch noch Gegenstand der Empfindung, oder kommt es durch eine Wahrnehmung zu Stande? Ich weiss es nicht.

Doch die Schwierigkeit mit der in Rede stehenden Begriffsbestimmung zu hantiren, liegt noch in anderen Dingen:

Gesetzt den Fall, in einem Krankenzimmer liegen zwei Patienten. Der eine klagt darüber, dass es im Zimmer kalt sei, der andere klagt, dass ihm kalt sei. Hat der erste wirklich eine Wahrnehmung und der zweite eine Empfindung? Und hat wirklich der zweite dessbalb eine Empfindung, weil er sich erinnert, einmal gelesen zu haben, dass das Kältegefühl von mangelhafter Blutzufuhr nach der Haut herrührt, und dass eine solche Circulationsstörung beim Fieber auftritt.

Ich glaube nicht, dass man sich entschliessen würde, in diesem Falle, bei dem man es offenbar mit bis an die höchsten Sphären psychischer Thätigkeit identischen Processen zu thun

[1] Eine ähnliche Analyse dieses Beispiels, nur zu anderen Zwecken verwendet, findet sich in einer Inauguraldissertation: „Zur Theorie der sinnlichen Aufmerksamkeit" von G. E. Müller. Leipzig bei Edelmann.

[2] Pflüger's Archiv I, pag. 388.

hat, einen so einschneidenden Unterschied zu constatiren, wie der zwischen Empfindung und Wahrnehmung im Allgemeinen ist.

Ich zweifle nicht, dass Helmholtz und andere Autoren die Halbheit dieser und ähnlicher Begriffsbestimmungen wohl gekannt haben. Es ist eben nicht möglich, im Gebiete der modernen Sinnes- und Gehirnphysiologie mit einer Nomenclatur und einem System zu arbeiten, die einer im Grunde gänzlich verschiedenen Wissenschaft entnommen sind. Wir müssen uns derartige Widersprüche so lange gefallen lassen, bis wir uns ein eignes System geschaffen haben.

Hier hat es sich nur darum gehandelt, nachzuweisen, warum es nicht in meiner Absicht liegen kann, den Vorgang, der beim Sehen einer Bewegung in unseren Nervenapparaten stattfindet, unter die Definition der Empfindung zu zwängen.

Es wird genügen, wenn ich nachweise, dass dieser physiologische Process sich durch gewisse, allgemein den Empfindungen zugesprochene Eigenthümlichkeiten charakterisirt.

Solche Eigenthümlichkeiten sind: 1. Eine reine Empfindung lässt sich in keiner Weise beschreiben.

Jede Beschreibung beruht auf Vergleichung mit gehabten Empfindungen. In unserem Sensorium charakterisirt sich aber eine bestimmte Empfindung nur dadurch, dass sie anders ist, als alle anderen Empfindungen, sie kann also auch keinen Vergleichspunkt haben.

2. Da die Empfindung immer das Primäre, die Wahrnehmung das Secundäre ist, so muss die Schärfe und Genauigkeit der letzteren durch die Schärfe und Genauigkeit der ersteren bedingt sein.

Ich komme endlich zu meinem Thema. Obwohl ich nirgends, ausser bei Vierordt,[1] eine Meinungsäusserung über das Sehen von Bewegungen finde, glaube ich doch wohl annehmen zu dürfen, dass man sich im Allgemeinen so wie dieser Forscher das Zustandekommen desselben, als das Resultat einer Gesichtswahrnehmung etwa folgendermassen vorstellt:

[1] Zeitsinn. Tübingen, 1868.

Das Auge sieht einen Gegenstand im Momente t_1 am Ort im Raume a_1, in t_2, in a_2, in t_3, in a_3 u. s. w. Es wird nun der Schluss gezogen, der Körper habe sich von a_1 nach a_3 u. s. w. bewegt.[1] Liegen diese Punkte der Orientirung im Raume gemäss in einer geraden Linie, so hat sich der Körper geradlinig bewegt, liegen sie in einer Curve, so hat er sich in dieser Curve bewegt.

Da schon die Richtung, in welcher ich den Körper in jedem Momente sehe, auf einer Wahrnehmung beruht, so muss das Erkennen der Bewegung umsomehr Gegenstand der Wahrnehmung sein.

Ich behaupte nun: ausser der oben geschilderten, nur bei langsamen Bewegungen vorkommenden Wahrnehmung gibt es nun auch eine Bewegungsempfindung. Ich folgere dies aus folgenden Umständen:

1. Ich setze eine schwarze Scheibe, auf welcher ein Durchmesser in Weiss gezogen ist, in Rotation, so dass sie sich mit einer Winkelgeschwindigkeit dreht, etwa von der Grösse der Winkelgeschwindigkeit des Minutenzeigers einer Uhr. Ich erkenne die Bewegung, und zwar dadurch, dass ich den weissen Streifen in verschiedenen Momenten in verschiedener Lage finde; ich erkenne sie auch dann durch den genannten Umstand, wenn ich den Streifen dauernd im Auge behalte. Steigere ich aber die Winkelgeschwindigkeit, so kommt ein Moment, wo sich der Eindruck, den ich habe, wesentlich ändert. Er ändert sich in der Art, dass der Unbefangene unwillkürlich geneigt ist zu sagen, jetzt sehe er die Bewegung, früher habe er sie nur erschlossen.

Der Eindruck bei langsamer Rotation war typische Wahrnehmung. Das, wodurch sich der zweite Eindruck von dieser unterscheidet, lässt sich in keiner Weise beschreiben, trägt also den Stempel der reinen Empfindung.

Es gibt für die Bewegungsempfindung, sowie für jede andere Empfindung eine Schwelle.

---

[1] Dass diese Punkte beträchtlich von einander entfernt sein müssen und jeder selbständig aufgefasst werden muss, während die Nachbarpunkte eine unwesentliche Rolle spielen, scheint eine specielle Auffassung Vierordt's zu sein.

Man glaube nicht, diesen Unterschied beschrieben zu haben, wenn man sagt, die Locomotion sei nur eine schnellere. Das ist der Unterschied zwischen der Bewegung des Stunden- und Minutenzeigers, dieser ist quantitativ. Der Unterschied zwischen der Bewegung des Minutenzeigers und jenes schneller gedrehten weissen Streifens ist aber für den Beobachter ein qualitativer.

2. Ein analoger Versuch, der von J. Czermak herrührt,[1] ist folgender: Fixirt man den schleichenden Secundenzeiger einer Taschenuhr, so sieht man seine Bewegung. Bringt man ihn dann in das indirecte Sehen — indem man etwa den Rand der Uhr fixirt, — so ändert sich der Eindruck. Man sieht auch jetzt noch, dass er in verschiedenen Momenten an verschiedenen Stellen ist, man sieht, wie er nach der Reihe mit den Strichen des Zifferblattes zusammenfällt, man sieht, wie er in der Minute eine Umdrehung vollendet, aber man empfindet nicht mehr die Bewegung, man nimmt sie wahr.

Es ist dies ein Versuch, der immer mit Leichtigkeit anzustellen ist, und der den Unterschied zwischen Bewegungsempfindung und Bewegungswahrnehmung klar zu machen geeignet ist.[2]

3. Hieher gehört der oben erwähnte Versuch über das Sehen von Bewegungen. Tritt ein Lichtblitz im Punkte *a* des Sehfeldes auf und 0·045 Secunden später ein solcher im Punkte *b*, so werden sie eben noch als zeitlich verschieden erkannt. Sind diese Punkte aber Anfangs- und Endpunkte einer wirklichen oder scheinbaren Bewegung, so wird ihre zeitliche Differenz noch bei 0·014 Secunden erkannt.[3] Man sieht dann eben einen hellen Punkt sich von *a* nach *b* bewegen. Wäre also das Erkennen der Bewegung ein Act der Wahrnehmung, welcher auf dem Erkennen der zeitlichen Differenz beruht, so würde die Richtung der

---

[1] Ideen zu einer Lehre vom Zeitsinn. Wiener Akad. d. W. XXIV.

[2] Czermak beschreibt den Versuch so, als würde man die Bewegung langsamer sehen, während man doch zugleich erkennt, dass der Zeiger, in derselben Zeit wie beim Fixiren, eine Umdrehung macht.

[3] Diese Zahlen befinden sich natürlich weit ausserhalb der Grenzen der Versuchsfehler.

genannten Bewegung wegen zu grosser Geschwindigkeit nicht mehr erkannt werden können.

Hieher, in dieses noch nicht bearbeitete Capitel der physiologischen Optik, über Bewegungsempfindungen und speciell in den Abschnitt über Bewegungstäuschungen, gehört der Versuch an stroboskopischen Scheiben, und Alles, was sich diesem anschliesst.

4. So wie die Empfindlichkeit unseres Sehapparates für Zeitunterschiede in gewissen Fällen unzureichend ist, um das Erkennen der Bewegung aus derselben zu erklären, so ist es auch seine Localisationsfähigkeit. Es handelt sich hier um die peripherischen Netzhautstellen. An diesen ist die Empfindlichkeit für Bewegung relativ sehr gross, für Localisation sehr klein.

Man schiebe bei guter Fixation seinen Finger von der Schläfenseite her in das Sehfeld, und halte inne, sobald er sichtbar wird. Er ist jetzt in einer Lage, in welcher er, so lange er ruhig ist, nicht gesehen wird, in welcher aber die kleinste Bewegung, die er ausführt, sofort auffällt. Auch wenn ich mich so gegen das Fenster stelle, dass der Finger stark erleuchtet ist, erkenne ich, offenbar wegen mangelhafter Localisation, nicht einmal einen hellen Fleck. Nur bei Bewegung wird er auch in seiner Gestalt sichtbar. Hier sehe ich also zweifelsohne Bewegung zwischen zwei Punkten im Sehfeld, welche ich bei Ruhe nicht mehr als different erkenne.

Doch ist dieser Versuch nicht vorwurfsfrei. Man könnte mit Recht einwenden, dass wir desshalb ruhende Gegenstände mit der Peripherie der Netzhaut so schlecht sehen, weil dieselbe sehr rasch ermüdet, oder weil es für uns unmöglich ist, derselben unsere Aufmerksamkeit unter diesen Umständen zuzuwenden u. s. w.

Ich änderte den Versuch also folgendermassen ab: Ein nach Art einer Stimmgabel gebogener Draht trug an seinen, den Zinken entsprechenden Enden zwei Pappscheiben von je 2 Ctm. Durchmesser. Mit diesen machte ich nun einen ähnlichen Versuch wie früher mit dem Finger. Indem ich den Draht auf- und abwärts bewegte (so dass die beiden Scheiben in ihrer gegenseitigen Lage verblieben), suchte ich erstens die geringste Elon-

gation, bei welcher ich die Bewegung noch erkannte, zweitens den grössten Abstand der beiden Scheiben von einander, bei welchem ich sie während der Bewegung noch zu einem weissen Fleck verschmolzen sah; natürlich für dieselbe Netzhautstelle.

Es zeigte sich, dass die Elongation kaum halb so gross sein muss, als die Entfernung der Scheiben von einander.

Das heisst also, dass eine Bewegung, welche zwischen zwei Stellen des Sehfeldes stattfindet, noch als solche erkannt wird, wenn dieselben so nahe aneinander liegen, dass sie selbst bei Bewegung keine gesonderten Localeindrücke liefern.

Man kann diesen Versuch, wenn es sich nicht um Genauigkeit handelt, auch mit zwei Fingern seiner Hand ausführen.

Es sei ausdrücklich bemerkt, dass ich diese Versuche, um mich vor Selbsttäuschung zu hüten, mit Beihilfe meines Freundes Dr. E. Fleischl anstellte, der das Signal handhabte, und gelegentlich statt des beschriebenen ein anderes mit nur einer weissen Scheibe in mein Gesichtsfeld führte. Nur dann, wenn ich nicht angeben konnte, ob das einfache oder das doppelte Signal in Anwendung war, und es war das Letztere der Fall, wurde der Versuch als brauchbar anerkannt.

Wenn man die weisse Marke in den unteren äussersten Theil des Sehfeldes bewegt, so kann man diese Bewegung noch da erkennen, wo man die Marke überhaupt nicht mehr sieht, d. h. wo man weder etwas irgendwie Begrenztes, noch auch etwas Weisses sieht. Es klingt fast komisch, dass man nur die Bewegung, nichts Bewegtes sehen soll, doch kann ich den Eindruck, den ich habe, nicht anders beschreiben. Übrigens gehört zu diesem Versuche einige Übung im indirecten Sehen, sonst arbeitet man mit zu wenig peripheren Netzhautstellen.

5. Dass einfache Empfindungen, besonders Gesichtsempfindungen negative Nachbilder haben, ist uns geläufig. Auch in dieser Richtung verhält sich die Bewegungsempfindung eben wie eine Empfindung. Sie hat ein Nachbild, das allgemein bekannt ist. Die Plateau'sche Spirale, der Oppel'sche Apparat zeigen dasselbe. Die Helmholtz'sche Erklärung, dass hiebei Augenbewegungen mit im Spiele sind, lässt sich wohl angesichts

der Modification, welche Dvořák[1] an der Plateau'schen Spirale anbrachte, nicht mehr halten.

Ich glaube, die angeführten Thatsachen sind unvereinbar mit der Ansicht von der ausschliesslichen Bewegungswahrnehmung, die ich eingangs auseinandergesetzt habe, und sind nur vereinbar mit der Annahme einer primären Bewegungsempfindung, welche der Sehnervenapparat vermittelt, sowie er die Empfindung der Farben, der Intensität und die Localempfindungen vermittelt.

Es sind vor Allem die peripheren Netzhautstellen, deren Hauptrolle es zu sein scheint, Bewegungen zu sehen. Wenigstens weiss ich keinen Fall, in welchem diese Theile der Netzhaut unmittelbar benützt werden, ausser den, in welchem mit denselben irgendwo eine Bewegung erkannt wird.[2] Unwillkürlich wenden wir dann unseren Blick nach den Ort dieser Bewegung. Es wird also niemals beobachtet mit der Netzhautperipherie, sondern nur bemerkt.

Erwähnen will ich noch, dass es uns nicht überraschen darf, das Sehen von Bewegungen unter den primitivsten Eigenschaften unseres Auges zu finden. Wer Thiere genau beobachtet, wird finden, dass ihre Augen ihnen in erster Linie dazu dienen, Bewegungen zu erkennen.

Es steht dies vor Allem in Bezug zu den Feinden und Gefahren, vor welchen sich die Thiere durch ihre Sinne zu schützen, oder zu der lebendigen Beute, die sie zu erjagen haben.

Ich will nicht von den Insekten sprechen, bei welchen es in der That scheint, dass sie überhaupt nichts schreckt als Bewegungen; doch sind ihre Augen von besonderem Bau, von wel-

---

[1] Wiener Akad. d. Wiss. 1870. Dvořák legte auf eine Spiralscheibe eine kleinere Scheibe mit entgegengesetzt laufender Spirale, auf diese etwa noch eine. Nach Drehung dieses Systemes erhält man ein Bewegungsnachbild, welches für die verschiedenen Zonen entgegengesetzt ist.

[2] Es gehört wahrscheinlich auch die Function der Netzhautperipherie hieher, auf den Weg zu achten, den wir gehen. Bekanntlich weichen wir jedem Stein aus, ohne ihn anzublicken. Es ist eben auch das Bild des Weges auf unserer Netzhaut in Bewegung, und man kann beobachten, dass ein Mensch, der stehen geblieben war, ehe er wieder ausschreitet, den Weg wirklich anblickt.

chem wir später reden werden. Aber auch höhere Thiere zeigen Ähnliches.

Ich habe mich vielfach überzeugt, dass eine Ringelnatter *(Tropidonotus natrix)* einen Frosch nicht bemerkt, so lange er ruhig in ihrem Käfig sitzt. Macht er aber den ersten Sprung, so ist er bemerkt und alsbald gefressen.

Rehe kennen den Jäger, so lange er sich ruhig verhält, nicht. Eine Rehgais mit ihrem Jungen weidete einmal eine Viertelstunde lang vor mir, indem sie mich häufig fixirte. Ich sass ganz frei auf einem Baumstrunk, und war ihr offenbar auffallend. Schliesslich legte sich das Thier sogar vor mir nieder. Bei meiner ersten leisen Bewegung entfloh es. Man beobachte eine Katze, wie stumpfsinnig sie für ruhende Objecte ist, und wie scharf sie die geringste Bewegung auffasst.

Die Facettenaugen.

In dieser Function des Auges als Bewegung erkennendes Organ scheint mir der Schlüssel zum Verständniss des Facettenauges zu liegen.

So unzweckmässig dasselbe zur flächenhaften und räumlichen Auffassung der Aussenwelt gebaut ist, so zweckmässig dürfte sein Bau zur Erkennung von Bewegungen sein.

Das Bild jedes Gegenstandes liegt in einer ganzen Gruppe von Facettenaugen und die Lageveränderung desselben muss erkannt werden durch die Empfindungsänderung in ganzen Gruppen von Facetten.

Wenn also, was noch nicht festgestellt ist, in jedem Einzelauge auch nur ein Nervenelement endigt, so müssen wir anerkennen, dass bei aller Mangelhaftigkeit der Localisation die Bedingungen zu feiner Empfindung von Bewegungen vorhanden sind, wenn wir nur die einzelnen Sehstäbe als hinlänglich empfindlich für Differenzen der Intensität ihrer Erregung annehmen. Die Anzahl der Facetten erlaubt doch so viel Localisation, dass die Richtung einigermassen ausgiebiger Bewegungen und der Ort des bewegten Gegenstandes im Raume erkannt werden können.

Ein Facettenauge würde also nach Art unserer peripheren Netzhautstellen fungiren, es würde mangelhafte Localempfindungen und deutliche Bewegungsempfindungen liefern.

Die Anordnung der Facettenaugen in Halbkugelform, sowie die gegenseitige Stellung des Halbkugelpaares am Kopfe, liefert den Insekten und Krebsen ein Gesichtsfeld von fast 360 Graden in jedem Meridian. Wären es wirklich 360 Grade, so wäre das Blicken überflüssig. In der That können viele Crustaceen ihre Augen ein wenig bewegen.

Um nicht blos eine Behauptung aufgestellt zu haben, will ich erstens kurz darauf aufmerksam machen, dass die tägliche Beobachtung an Insekten uns lehrt, dass sie in der That fast nur Bewegungen sehen. Sie sehen zwar Hell und Dunkel, auch die Richtung derselben, denn sie fliegen nach dem Fenster und wollen durch die Glasscheibe, sie erkennen aber weder ihre Nahrung, noch ihre Feinde mit den Augen. Die Stubenfliege bestrebt sich nicht, in ein hermetisch verschlossenes Obstglas zu kommen, setzt sich ungescheut auf ausgestopfte Vögel. Blos der Geruch lockt sie und die Bewegung schreckt sie auf. Einen Schmetterling und viele andere fliegende Insekten kann man bei hinlänglich langsamer Annäherung fast oder wirklich berühren.

Zweitens will ich zeigen, dass das Facettenauge zu dem Zwecke, den ich ihm zuspreche, wirklich sehr dienlich gebaut ist.

Denken wir uns statt des ausgebildeten Facettenauges gleichsam ein primitives, in welchem eine auf einer Halbkugel angebrachte Gruppe Nervenendigungen frei dem Lichte ausgesetzt und für dasselbe empfindlich ist.

Es befinde sich auf der einen Seite dieses Auges eine Lichtflamme, dann werden die Strahlen der Flamme die Nervenelemente zum Theile unter senkrechter Incidenz, zum Theile unter schiefer Incidenz treffen, während auf der anderen Seite des Auges keine Erregung stattfindet. Es ist also dadurch die Möglichkeit gegeben, wenn auch ungenau, die Richtung der Lichtflamme zu erkennen.

Jetzt möge diese sich nach der anderen Seite bewegen, so wird da Erregung auftreten, wo früher Ruhe war und umgekehrt.

Diese successive Änderung in dem Erregungszustande der neben einander befindlichen Nervenelemente muss empfunden werden und kann, wie dies beim menschlichen Auge der Fall ist, nur als Bewegung empfunden werden; diese Empfindung muss verhältnissmässig intensiv sein, da ja eine grosse Menge von Nervenelementen an derselben betheiligt ist: alle, welche die Strahlen der Flamme treffen. Es sind in der That alle erregten Nervenelemente, welche eine Änderung des Erregungszustandes erfahren, nicht nur, wie man etwa glauben könnte, und wie es beim Säugethierauge wirklich der Fall ist, die Elemente an der Peripherie der gereizten Gruppe. Es sind deshalb alle, weil nur im Centrum dieser Gruppe die Strahlen der Flamme senkrecht auffallen, also nur hier das Maximum der Erregung ist. Nach der Peripherie nimmt die Erregung continuirlich ab. Bei Bewegung der Flamme verschiebt sich dieses Centrum höchster Erregung, desgleichen die um dasselbe liegenden Zonen gleicher Erregung. Es muss also jedes Nervenelement seinen Erregungszustand ändern. Auch die Richtung der Bewegung kann erkannt werden, da, wie wir sahen, Localisation vorhanden ist.

Nun kann sich dieses primitive Auge nach zweierlei Richtung ausbilden, erstens nach der Localisation, zweitens nach der Intensität der Empfindung.

Wären Einrichtungen getroffen, denen zufolge die Strahlen unserer Kerzenflamme weniger Nervenelemente treffen, so würde besser localisirt werden, und wären Einrichtungen da, durch welche eine grössere Anzahl der von der Flamme ausgehenden Strahlen auf dem Nervenelemente vereinigt würden, so wäre die Erregung desselben eine grössere. Es sind nun in der That solche Einrichtungen vorhanden.

Denken wir uns über jede Nervenendigung einen geschwärzten, radiär auf der Halbkugel des Auges aufsitzenden Cylinder gestülpt, so dass das empfindende Element am Grunde des Cylinders sitzt. Dann gelangen zu diesem nur solche Strahlen von der Lichtflamme, welche nahezu oder ganz parallel der Axe des Cylinders auffallen. Es wird also nur eine kleine Gruppe Nervenenden erregt, d. h. das Auge localisirt besser. Diese schwarzen Cylinder sind die Pigmentscheiden, welche jedes Einzelauge

umkleiden. Auch das Pigment, welches eine Corneafacette von der andern trennt, fungirt in derselben Weise.

In je mehr solche Facetten das Auge getheilt ist, desto besser wird es localisiren, desto grösser muss aber die Intensität des einwirkenden Lichtes sein, um in einem Elemente eine Erregung von gewisser Grösse hervorzurufen. Dem entspricht es, dass, wie Max Schultze anführt,[1] die Nachtschmetterlinge grössere Facetten haben als die Tagschmetterlinge.

Um den Verlust an Empfindungsintensität, der, wie wir sahen, durch die Facettirung entstand, zu paralysiren, dient der optische Apparat des Einzelauges. Er besteht bekanntlich aus einer Corneafacette, welche verschiedenartig gewölbt sein kann und einem im Allgemeinen kegelförmigen, stark lichtbrechenden Körper, dem Krystallkegel, welcher hinter der Cornea liegt und dessen Axe zusammenfällt mit der optischen Axe der Corneafacette. Dieser Apparat hat, wie ich die Sache ansehe, den Zweck, zu verhindern, dass das Licht, das aus einer von der Axe des Auges nicht zu weit abweichenden Richtung kommt, auf die Pigmentscheide oder auf einen anderen nicht empfindenden Theil des Augenhintergrundes falle und so für die Empfindung verloren gehe. Er bezweckt die Sammlung dieser Strahlen auf dem schmalen Sehstab.

Dieser oder ein Theil desselben muss nach der Ansicht einer Reihe von Autoren als empfindendes Element angesprochen werden. Wir haben es hier also mit einer Art Lichtcondensator, wie wir solche an unseren Mikroskopen zur Beleuchtung der Objecte anbringen, zu thun.

Beim Mikroskop soll das concentrirte Licht beleuchten, dort soll es in dem kleinen Sehstab die grösstmögliche Nervenerregung hervorrufen.

Man könnte sagen, die Natur hätte den Sehstab an seinem äusseren Ende breiter machen können, dann hätte sie das Licht nicht auf dem kleinen Querschnitt desselben vereinigen müssen. Das ist richtig, und sie hat es auch bei vielen Thieren so gethan (s. die Abbildungen Max Schultze's, Taf. II, Fig. 5 und

---

[1] Die zusammengesetzten Augen der Krebse und Insekten. Bonn, 1868.

25 von *Scarabaeus stercorarius* und *Syrphus*), doch wäre dadurch der optische Apparat noch nicht überflüssig, da alle einzelnen Facettenaugen wegen ihrer Anordnung auf einer Kugel die Form eines abgestutzten Kegels haben müssen.

Die Lichtstrahlen müssen also gegen die Spitze des Kegels zugeführt werden. Wie dies geschieht, scheint mir für die Function des Facettenauges gleichgiltig. Es könnte geschehen durch Brechung an kugeligen Flächen; dann wird von einem äusseren Gegenstand im hinteren Brennpunkte des Systemes, der am Sehstab liegt, ein Bildchen entstehen. Dieses Bildchen ist als Zweck des optischen Apparates der Facettenaugen oftmals vermuthet und wenigstens vermeintlich [1] wirklich gesehen worden.

Nach meiner Auffassung hat dieses Bildchen keine andere Bedeutung als jenes, welches in der Höhe des mikroskopischen Präparates entsteht, wenn wir dasselbe mittelst Condensator beleuchten, oder das bei Anwendung eines Hohlspiegels an derselben Stelle entsteht. Es ist ja auch Niemandem in den Sinn gekommen, eine neue Theorie des Sehens für das Wirbelthierauge aufzustellen, seit Boll [2] nachwies, dass auch durch die Stäbchen der Tritonretina Bildchen entworfen werden. Es haben diese, wie die Facettenbilder keine Bedeutung für den Zweck, den die Strahlen zu erfüllen haben. Das, um was es sich hier handelt, ist, dass die Lichtstrahlen im Bildchen am engsten beisammen liegen, also die stärkste Empfindung verursachen können. Dass ich darin Recht habe, will ich an der Hand der Abbildungen Max Schultze's [3] nachzuweisen suchen.

Auf Tafel I, Fig. 16, findet sich ein Krystallkegel von Palämon, dessen äusseres Ende ein stumpfer Kegel ist. Durch diesen Krystallkegel kann niemals ein Bild erzeugt werden; die Strahlen, welche von einem Punkte ausgegangen sind, vereinigen sich nie wieder an einem Punkte, sie werden aber sämmtlich der Axe des Krystallkegels zugebrochen. [4] Im Innern des Krystall-

---

[1] Ich komme später auf dieses Bildchen zurück, und will vorläufig die bisher geltenden Ansichten hierüber als richtig annehmen.

[2] Du Bois-Reymond u. Reichert's Archiv. 1871.

[3] L. c.

[4] Wollte hier etwa Jemand annehmen, dass die Hornhaut, an welche

kegels befindet sich ein noch stärker lichtbrechender Abschnitt, die „Linse“. Die hintere Fläche dieser, welche, wie schon Gottsche[1] von dem Krystallkegel dieses Thieres angibt, in mehrere Kuppen gewölbt ist, würde für sich allein auch das Zustandekommen eines Bildes unmöglich machen.

Die Figuren 1 und 2 derselben Tafel zeigen Krystallkegel von *Carcinus maenas*. Dieselben sind „vierwulstig und gleichen einem Pokal“. „Am Querschnitt gleichen sie einem vierblätterigen Kleeblatt“. Sie haben also vier über die ganze Länge bis an die vordere Spitze verlaufende Einkerbungen. Ihr vorderes Ende selbst hat ein Profil, das zwischen Conus und Kugelfläche steht. Durch diesen Krystallkegel kann ebenfalls niemals ein Bild entstehen, wohl aber müssen durch denselben die Strahlen im Allgemeinen der Axe zugebrochen werden.

Ein weiterer Umstand, der das Zustandekommen guter Bilder fraglich macht, ist der, dass die Krystallkegel gewöhnlich oder immer aus vier der Länge nach zusammengekitteten Stücken bestehen, die leicht auseinanderfallen. Die Berührungsflächen sind, wie ich mich an *Hydrophilus piceus* überzeugte, an ganz frischen Krystallkegeln, die im Blute des Käfers untersucht wurden, sichtbar, und zwar nicht nur an der Oberfläche des Kegels, sondern, wie man durch Einstellung sehen kann, durch die ganze Dicke des Kegels. Die Flächen liefern deutliche Reflexe, sind also dem Zustandekommen eines Bildchens in hohem Grade hinderlich.

Es änderte an diesen Betrachtungen nichts, wenn etwa Jemand sich darauf berufen wollte, dass das Bild durch Brechung in der Hornhaut allein entsteht. Dann würde es durch die genannten Krystallkegel wieder zerstört werden.

Nach alledem wird man geneigt sein zu sagen, ich bemühte mich zwar nachzuweisen, dass theils dem Zustandekommen des Bildchens viele Hindernisse im Wege stehen, theils ein solches

---

sich dieser Krystallkegel anschliesst, an der hinteren Fläche dieselbe Gestalt und denselben Brechungsindex hat wie dieser, also eine Brechung an dieser Fläche gar nicht stattfindet, so kommt er mit dieser Hypothese bei den sogleich zu beschreibenden Fällen nicht aus.

[1] Müller's Archiv. 1852.

Bildchen gar nicht entstehen kann; in vielen Fällen aber ist es da, man kann es sehen, und da ist es doch schwer zu glauben, dass es als solches keine Rolle zu spielen hat, dass es nicht eine ähnliche Rolle zu spielen hat wie das Netzhautbild der Wirbelthieraugen.

Gottsche[1] beschreibt es ausführlich, wie es scheint, in der Meinung, es entdeckt zu haben[2]. Er gibt eine Vorschrift, wie man es bei der Fliege darzustellen habe, und sagt, er erkenne im Bildchen die Verzierungen einer Stahlfeder etc. Aus einer Anmerkung, welche Johannes Müller diesem Aufsatze Gottsche's beigefügt hat, glaubte man entnehmen zu können[3], dass er sich bestimmt gefühlt habe, seine Ansichten vom Sehen des Facettenauges in Folge der neuen Mittheilungen über das Bildchen aufzugeben. Es lohnt sich also wohl, dieses Facettenbildchen etwas genauer ins Auge zu fassen, und zu studiren, ob es als Netzhautbild fungiren kann.

Ich habe das Facettenbild der Fliege nach der Vorschrift Gottsche's wiederholt hervorgerufen. Doch liess die Reinheit dieses Bildes noch manches zu wünschen übrig.

Die schönsten Bilder, die ich an einem Facettenauge überhaupt zu Stande brachte, sind die von *Hydrophilus piceus*, und diese Bilder benützte ich also auch, das Facettenbild im Allgemeinen genauer zu studiren. Eignet es sich zu einem Netzhautbild? Wir haben nach unseren vorläufigen Kenntnissen kein Recht, diese Frage zu bejahen, aus folgenden Gründen:

1. Ich mache nachstehenden Versuch: Eine Convexlinse von 2 Zoll Brennweite bringe ich im Hintergrunde des Zimmers an, so dass ich durch dieselbe, oder besser, hinter derselben, das Bild des Fensterkreuzes sehen kann; zwischen Fenster und Linse, 8 Zoll von letzterer entfernt, setze ich senkrecht einen Bleistift. Befindet sich mein Auge circa einen Fuss hinter der Linse, so sieht es das Fenster und innerhalb desselben den Bleistift merklich gleich deutlich. Nun fange ich das Bild des Fensters auf einem durchscheinenden Schirm auf und vermisse

---

[1] Müller's Archiv, 1852.

[2] Es war schon Leeuvenhök u. a. bekannt.

[3] Leidig. Das Auge der Gliederthiere. Tübingen, 1864, pag. 45.

vollständig das Bild des Bleistiftes. Schiebe ich den Schirm um 2—3 Zoll weiter von der Linse weg, so erhalte ich das Bild des Bleistiftes, und vom Fenster nur mehr einen verwaschenen hellen Fleck als Bild.

Dieser keiner weiteren Erläuterung bedürftige Versuch soll hier nun daran erinnern, wie sehr sich ein Luftbild, das für unser Auge merklich scharf ist, von einem scharfen aufgefangenen Bilde unterscheidet. Das Facettenbild kennen wir nur als Luftbild, das Netzhautbild kennen wir als aufgefangenes Bild.

Ich folgere: Während das Netzhautbild merklich in einer Ebene liegt[1], haben wir vorläufig keinen Anhaltspunkt, dasselbe vom Facettenbilde anzunehmen. Die Antheile dieses Bildes, die wir deutlich sehen, liegen vielleicht in sehr verschiedenen Ebenen (welche natürlich senkrecht auf die optische Axe des Facettenauges gedacht sind). Würden wir also dieses Bild mit einem Schirm auffangen können, so würden wir vielleicht immer nur einen unverhältnissmässig kleinen Antheil desselben deutlich bekommen. Hierdurch wäre es aber als Netzhautbild im gewöhnlichen Sinne unbrauchbar.

Ich sagte eben, dass das Bild des Facettenauges vielleicht in „sehr verschiedenen Ebenen“ liegt. Es kann zwar kaum zweifelhaft sein, was ich mit diesem Ausdrucke sagen will. Ich meine, dass ein Punkt des Gegenstandes schon einen starken Zerstreuungskreis auf einer Ebene entwirft, auf welcher ein anderer Punkt des Gegenstandes noch ein deutliches Bild liefert.

Wir können zwar mit dem Mikroskope, unter dem wir das Bild beobachten, ziemlich genau auf verschiedene Ebenen einstellen, doch reicht diese Genauigkeit nicht hin, um die hier vorgebrachte Frage zu entscheiden. Also selbst, wenn das Bild ein ebenes zu sein scheint, was nie vollkommen der Fall ist, ist es möglicherweise als Netzhautbild noch zu wenig eben. Ich will dies genauer nachweisen.

---

[1] Es ist dies natürlich im gewöhnlichen optischen Sinne gemeint.

Ich machte mir ein Präparat des genannten Auges, legte es in Wasser, bedeckte es mit einem Deckgläschen, liess aber die Luftblase, welche Gottsche unter demselben absperrte, hinweg, da sie beim Hydrophilus nicht wie bei der Fliege zur Hervorrufung des Bildes nöthig ist. Die Beleuchtung geschah mit dem Planspiegel. Ich benützte ein Hartnack'sches Mikroskop mit den Linsen. Okul. 3 und Objt. 8. Ich hatte ausserordentlich schöne Bildchen des Fensterkreuzes.

Zwischen Fenster und Mikroskop brachte ich nun einen Schirm, der zwei Löcher von je 2 Ctm. Durchmesser hatte. Er war vom Präparat (mit Einrechnung der Distanz vom Spiegel bis zum Object) 192 Ctm. entfernt, die Distanz der beiden Löcher betrug 5·8 Ctm.

Diese Löcher nun waren im Facettenbilde noch als zwei zu erkennen. Ihre Entfernung im Bilde betrug 0·00133 Mm.

Die Entfernung des Bildchens von der hinteren Hornhautfläche betrug 0·020 Mm. Sie wurde bestimmt, indem zuerst auf die Hornhautfacette eingestellt, dann die Mikrometerschraube des Mikroskopes so lange gedreht wurde, bis das Bildchen scharf war. An dem Kopfe der Mikrometerschraube befand sich ein Zeiger, der über einer Gradtheilung strich. So lässt sich die Drehung sehr genau bestimmen und dann aus der Anzahl der Grade und dem Werth eines Schraubenganges die Entfernung ermitteln.

Endlich beträgt der Durchmesser einer Hornhautfacette 0·026 Mm. Aus den genannten Daten lässt sich berechnen, wie weit hinter der Ebene der deutlichen Bildchen unserer beiden hellen Öffnungen des Schirmes die Zerstreuungskreise derselben schon so gross sind, dass sie sich gegenseitig berühren. Es ist dies der Fall 0·014 Mm. hinter dem deutlichen Bilde derselben. Das ist eine Entfernung, welche geringer ist als die Dicke eines menschlichen Blutkörperchens. Zwei Blutkörperchen und auch mehr, welche übereinanderliegen, erscheinen uns aber mit der genannten Vergrösserung noch ganz scharf conturirt, wieviel mehr wird dies ein Facettenbildchen thun, bei welchem man immer starke Lichter an starke Schatten grenzen lässt. Wir können also aus dem mikroskopischen Befunde nicht schliessen, dass das Bildchen für ein Netzhautbild hinlänglich eben ist.

2. Aus den eben angestellten Betrachtungen folgt weiter, dass die lichtempfindliche Schichte einer Netzhaut, welche die Details an dem Bildchen wahrnehmen soll, die wir an demselben erkennen, die Dicke eines menschlichen Blutkörperchens kaum überschreiten darf. Ist sie dicker, so werden die Elemente, welche die Empfindung eines hellen Punktes in unserem Beispiele vermitteln sollen, auch schon vom Zerstreuungskreise des anderen getroffen. Die Vorstellung einer so dünnen empfindlichen Schichte scheint mir gewisse Schwierigkeiten zu haben, umsomehr, als von keinem der Untersucher des Facettenauges etwas von einer solchen Schichte, welche in der Gegend des Bildchens liegen würde, angegeben wird.

Endlich will ich noch erwähnen, dass man sich vorstellen könnte, Punkt 2 komme nicht in Betracht, weil es ja möglich ist, dass die eventuelle Netzhaut der Krümmung des Bildchens gleichsam nachginge. Die Krümmung des Bildchens könnte mit der Krümmung der Netzhaut identisch sein. Das wäre denkbar, hat aber in der Anatomie wenig Anhaltspunkte, wie diese überhaupt der Vorstellung der Perception eines Netzhautbildes keine Stütze bietet. Man bedenke, dass die Nervenfaser nach der Angabe von Max Schultze die Spitze des Krystallkegels umgreift, ja in langen Fortsätzen an derselben hinaufläuft. Eine so starke Krümmung, wie die Spitze des Krystallkegels hat, hat kein Facettenbild, diese würde man durch Einstellung sehr gut sehen.

In Boll's oben citirter Abhandlung findet sich noch eine ganze Reihe von Thatsachen anatomischer Natur, welche er gegen die Vorstellung, als läge im Grunde des Facettenauges eine Retina, ins Feld führt.

Ich bin mit meinen Anfechtungen des Facettenbildchens noch nicht zu Ende. Vielmehr komme ich jetzt dazu, nachzuweisen, dass das Facettenbild im Sinne der Autoren, also das Bild, das am Grunde des optischen Apparates des Facettenauges an der Stelle des Endes der Opticusfaser entstehen soll, noch von Niemand gesehen wurde. Ich habe die Dinge bisher so behandelt, als existirte dieses Bildchen, weil ich es für sehr möglich halte, dass es in einer oder der anderen Thierspecies

wirklich existirt. Für dieses wird dann, mit wenig Umänderungen alles das gelten, was ich eben auseinandergesetzt habe.

Das, was als Facettenbilder beschrieben wurde, und was eben auch ich als solches behandelte, sind Bilder, welche niemals im Insektenauge zu Stande kommen, es sind Bilder, welche nur von der Corneafacette allein entworfen werden, bei deren Zustandekommen der Krystallkegel vollkommen unbetheiligt ist. Schneidet man einer Fliege oder dem von mir gebrauchten Käfer eine Kuppe vom Auge herab, und legt sie auf einem Objectträger mit der Convexität nach unten, lässt durch den Planspiegel Licht auf dasselbe fallen, so sieht man zunächst keine Bilder, sondern nur einzelne sehr helle Punkte an den Stellen, an welchen man in Richtung der optischen Axe des Facettenauges durch das Präparat hindurch sieht. Es ist dies offenbar der Ausdruck der an der Krystallkegelspitze vereinigten Lichtstrahlen, welche durch den Sehstab hindurch in unser Auge gelangen. Im Übrigen ist alles schwarz von Pigment. Hinter diesem Pigment, welches Krystallkegel und Sehstab einhüllt, könnte nun das Bildchen liegen; um es zu sehen, muss das Pigment entfernt werden. Gottsche thut dies mit einer Beer'schen Stahrlanze, ich that es mit einem feinen, wenig feuchten Pinsel, während die Cornea im Wasser oder im Blute des Käfers lag. Wie immer es geschehe, es lösen sich sämmtliche Krystallkegel auf diese Weise ab, so dass man die nackten Hornhautfacetten bekommt. Ich überzeugte mich auch speciell bei der Fliege *(Musca vomitans)*, welche Gottsche benützte, dass auch bei dieser, selbst bei zarterer Behandlung, als sie Gottsche anwendete, sämmtliche Krystallkegel losgelöst und bis zur Unkenntlichkeit verunstaltet werden. Schon Max Schultze sagt: „Sehr weiche Krystallkegel besitzen die meisten Krebse und unter den Insekten die Orthopteren, Hymenopteren, Dipteren, Neuropteren und Tagschmetterlinge. Ihre Isolirung ist im frischen Zustande selbst beim Präpariren in Serum mit Schwierigkeiten verbunden, da sie eine grosse Neigung zur Zersetzung und Quellung besitzen“.

Auch beim Käfer ist es mir nie gelungen, nach Entfernung des Pigmentes die hier viel derberen Krystallkegel noch an der Cornea zu sehen. Es ist also kein Zweifel, was man sah, waren

immer nur die Bildchen, welche die gewölbten Hornhautfacetten als Sammellinsen entwarfen und im Insektenauge entwerfen würden, wenn hinter ihnen nicht der Krystallkegel läge. Ein zweiter Fehler, der allgemein gemacht wurde, ist der, dass man die Augen in Flüssigkeit, Gottsche sogar in Glycerin, ansah. Dadurch muss selbstverständlich die Brechung an den Hornhautflächen wesentlich geändert werden [1].

Ich will versuchen, die Art dieses Fehlers zu bestimmen, und dabei, soweit es die Genauigkeit der Messungen zulässt, Einiges über die Dioptrik des Insektenauges beibringen. Wegen der oben angeführten Umstände wähle ich hierzu das Auge des grossen Wasserkäfers *(Hydrophilus)*. Dieser hat eine Cornea, welche an ihrer äusseren vorderen Fläche eine Facettirung nicht erkennen lässt, sie ist gleichmässig gewölbt. Die hintere Fläche ist besetzt mit Buckeln, von denen jeder einem Facettenauge entspricht und dessen Wölbung als hintere brechende Fläche der Cornea des Einzelauges fungirt.

Die Dicke dieser Einzelcornea, wie ich sie nennen will, beträgt von Scheitel zu Scheitel, an einem dünnen frischen Schnitt gemessen, 0·077 Mm. Davon entfällt auf die Höhe der Kuppe 0·0094 Mm.

Wir haben es also hier mit einer sehr dicken Linse zu thun, deren vordere Fläche an Luft, deren hintere an Wasser grenzen soll. Sind die Krümmungshalbmesser der Linsenflächen und der Brechungsindex der Linse bekannt, so lassen sich, da wir die Entfernung der brechenden Flächen schon kennen, die optischen Eigenschaften der Linse berechnen.

Den Krümmungshalbmesser der vorderen Fläche bestimmte ich auf ophthalmometrischem Wege. Doch lässt sich die gewöhnliche, für das menschliche Auge verwendete Berechnung

---

[1] Jedenfalls geschieht dies mit der Brechung an der vorderen Fläche, und die Voraussetzung, dass die Brechung an der hinteren Fläche eine solche ist wie im lebenden Auge, involvirt die Voraussetzung, dass der Brechungsindex des Krystallkegels gleich ist dem Brechungsindex des Glycerins, dass die bestehende Schichte zwischen Cornea und Krystallkegel so dünn ist, dass man sie vernachlässigen kann, oder ähnliche gewagte Voraussetzungen.

hier nicht mehr mit Sicherheit anwenden, weil die Länge des Spiegelbildes zu der des Krümmungshalbmessers zu gross ist. Ich bestimmte also auch mit dem Zirkel auf dem Schnitt und fand übereinstimmend einen Krümmungshalbmesser von 1·4 Mm.

Der Krümmungshalbmesser der hinteren Fläche wurde auf folgende Weise bestimmt: Das mikroskopische Bild eines wohlgelungenen Schnittes wurde auf Papier projicirt, da abgezeichnet, und mit dem Zirkel der Radius bestimmt. Ich fand 0·013 Mm. Der Brechungsindex wurde indirect bestimmt aus der Lage des von dem optischen Apparate entworfenen Bildes.

Die Entfernung desselben von der hinteren brechenden Fläche bestimmte ich ähnlich wie oben: Eine in beschriebener Weise präparirte Gesammtcornea ward mit der Convexität nach unten auf einen Objectträger aus Glimmer gelegt, in dem ein Loch gebohrt war. Dieses Loch überdeckte die Cornea. In die Höhlung derselben kam ein Tropfen Wasser, und dann ward sie mit einem Deckgläschen so zugedeckt, dass dieser Wassertropfen eine ebene Begrenzung hatte. Dass die vordere Corneafläche wirklich an Luft grenzte, konnte erkannt werden, indem sich die Grenze des Wassers in der Nähe des Randes der Glimmeröffnung durch den starken Reflex hervorhob. Nun wurde mit der Mikrometerschraube eingestellt auf die Grenzen zwischen den einzelnen Buckeln der mit den optischen Axen senkrecht stehenden Facetten, dann auf das Bildchen, welches eine derselben vom entfernten Fenster entwarf. Ich brauche wohl kaum zu erwähnen, dass der Planspiegel des Mikroskopes benützt werden muss.

Aus der Anzahl der Winkelgrade, um welche die Mikrometerschraube gedreht wurde und der Höhe eines Schraubenganges, sowie unter Beachtung dessen, was oben über die Höhe der Kuppe gesagt wurde, lässt sich wieder wie oben, die gesuchte Entfernung bestimmen.

Nicht in jedem Falle war ich im Stande, die Einstellung auf die Basis der Kuppe genau zu machen, oft hindern die Reflexe und Zerstreuungskreise. Bisweilen aber gelingt es, die Einstellung so scharf zu machen, dass man sich in den einzelnen Bestimmungen nicht mehr als um 3—5 Winkelgrade irrt.

Ich fand einen Brechungsexponenten von 1·82. Er steht also dem Brechungsexponenten des Flintglases (1·984 nach Herschel) nicht mehr ferne.

Aus den genannten Grössen lässt sich berechnen die erste und zweite Hauptbrennweite in Millimetern:

$$F_1 = 0{\cdot}027$$
$$F_2 = 0{\cdot}036.$$

Die Entfernung des ersten Hauptpunktes von der ersten brechenden Fläche

$$h_1 = 0{\cdot}043$$

in der Richtung der einfallenden Strahlen gerechnet.

Entfernung des zweiten Hauptpunktes von der zweiten brechenden Fläche

$$h_2 = 0{\cdot}00087$$

nach der Richtung der Strahlen vor derselben gelegen, also gerade noch innerhalb des optischen Apparates.

Man kann eine Probe auf diese Rechnung machen, wenn man die aus den gefundenen Daten berechnete Grösse des Bildchens vergleicht mit der Grösse eines gemessenen Bildchens. Ich fand in meinem Falle nach der Rechnung 0·006 Mm. und nach der Messung 0·007 Mm.

Die Differenz liegt noch innerhalb der Fehlergrenzen der Messung des Bildchens.

Übrigens scheinen, sowie in der Form der Facetten auch in den Krümmungshalbmessern der brechenden Flächen nicht unbeträchtliche Differenzen je nach der Localität im Gesammtauge vorzukommen.

Es lässt sich nun leicht bestimmen, wie das Bild liegen muss, wenn man die Hornhautfacette auf einen gewöhnlichen Objectträger in Glycerin legt. Das Bild liegt dann 0·055 Mm. von der hinteren Hornhautfläche entfernt, während diese Entfernung im Wasser 0·037 Mm. beträgt.

Die Rechnungen hierüber, sowie über das Vorhergehende, gebe ich, um die Darstellung nicht zu unterbrechen, im Anhang. Sie können, wie aus dem Obigen erhellt, nicht Anspruch auf absolute Genauigkeit machen, doch zeigen sie hinlänglich, welcher Art die Wirkung der Corneafacette ist.

Man sieht also, dass das Bild, welches durch die einzelne Hornhautfacette entworfen wird, weder da liegt, wo man es bisher gesehen hat, noch einen Anhaltspunkt zur Bestimmung des Refractionszustandes des Insektenauges gibt; Gottsche hatte gefunden, dass seine Fliege Myop sei.

Ich habe gezeigt, dass das Facettenbild, wie man sich dasselbe vorstellte, nie gesehen wurde und habe dann gezeigt, auf welche Weise das Bild, das man sieht, zu Stande kommt. Dieses in meiner Weise dargestellt, gibt Aufschluss über die Art, wie die Strahlen in der Cornea auch beim lebenden Thiere wirklich gebrochen werden.

Die Kenntniss dieses Bildes verhilft mir dazu, zu zeigen, dass das Bild, wie man sich dasselbe bisher vorgestellt hat, das am Grunde des Einzelauges an der Spitze des Krystallkegels liegen soll, nicht zu Stande kommen kann.

Denn erstens ist das Bild zu gross, so dass es keinen Platz im Krystallkegel hat: Dieser geht unten vollkommen spitz zu, so dass gar kein messbares Bild in der eigentlichen Spitze Platz hat (s. die Fig. bei *a*), doch hat er vor seiner Spitze eine geringe Anschwellung. Aber auch diese ist nur 0·011 Mm. breit und ich mass das Bildchen gelegentlich zu 0·017 Mm. Es könnte aber vielleicht ein centraler Antheil des Bildchens percipirt werden.

Ich halte auch das nicht für möglich, weil zweitens die Strahlen, welche in den Krystallkörper eindringen, viel später vereinigt werden, als es in unserem Falle geschieht, wo das letzte Medium Wasser war.

Die Hornhautfacette verdankt ihre geringe Brennweite in erster Linie dem ausserordentlich kleinen Krümmungshalbmesser der hinteren Fläche, welche an Wasser grenzte. Nun fällt die Brechung an dieser Fläche nahezu weg, denn an sie schliesst sich unmittelbar der etwas concave Krystallkegel. Dieser hat einen leider nicht bestimmbaren, aber jedenfalls sehr grossen Brechungsindex, so dass aus diesem Grunde eine Vereinigung der Strahlen an der Spitze des Krystallkegels nicht zu Stande kommen kann, umsoweniger, als das in Wasser liegende Bildchen nun 0·037 Mm. von der hinteren Hornhautfläche entfernt ist; für den Fall, dass der Krystallkegel denselben Brechungs-

index hätte wie die Cornea, und die Schichte zwischen diesen beiden unendlich dünn wäre, so würde das Bild erst in einer Entfernung von circa 3 Mm. entstehen.

Da es überaus schwer ist, zu bestimmen, ob die zwischen hinterer Hornhautfläche und Krystallkegel gelegene Schichte wirklich so dünn ist, dass sie bei der Strahlenbrechung nicht in Betracht kommt, und da ich kein Mittel weiss, den Brechungsindex des Krystallkörpers zu bestimmen, so kann ich das eben angestellte Raisonnement nicht mit Zahlen belegen; eines aber lässt sich mit Bestimmtheit sagen: die Divergenz der Hauptstrahlen, welche in der Cornea erzeugt wurde, kann durch das Dazwischentreten des Krystallkegels nicht mehr wesentlich alterirt, wahrscheinlich nur vermehrt werden, mit anderen Worten, das Bildchen, das zu Stande käme, wäre noch grösser als das, das wir in Wasser zu Stande kommen sahen, und hätte also noch weniger als dieses in der Spitze des Krystallkegels Platz; die Strahlen, welche die äusseren Theile des Bildchens bilden sollten, müssten von der Wand des Krystallkegels durch totale Reflexion zurückgeworfen werden, würden vielleicht erst nach mehrfacher Reflexion die Spitze des Krystallkegels erreichen und hier den centralen Theil des Bildchens trüben, wo nicht unkenntlich machen. (Siehe die Abbildung: das Auge II.)

Es war mir hier darum zu thun, nachzuweisen, dass uns selbst das schöne Bild des Käferauges nicht berechtigt, der gangbaren Ansicht von der Function desselben als Netzhautbild beizustimmen [1].

Jetzt will ich noch einen Umstand anführen, welcher geeignet ist, die Frage zu beleuchten, ob der optische Apparat des Facettenauges dazu dient, ein Bild zu entwerfen, oder ob er nur bestimmt ist, theils durch Brechung, theils durch totale Reflexion, die aus einer Richtung kommenden Strahlen zu concentriren.

---

1 Über die Brechung in der Hornhautfacette sind auch Rechnungen angestellt von Bronts, Zenker, Rüte und Dor. Natürlich konnte ich dieselben zu meinen Zwecken nicht verwenden, da ich die Verhältnisse in meinem speciellen Falle verfolgen musste.

Es gibt in unseren Gegenden einen Käfer, dessen Krystallkegel mit der Cornea verwachsen sind, es ist dies das Leuchtkäferchen *Lampyris splendidula* [1]). Max Schultze gibt hierüber eine Abbildung. An der hinteren Fläche der gewölbten und facettirten Gesammtcornea sitzen wie ein Wald von Stacheln die Krystallkegel auf und lassen sich nur mit muschligem Bruch losbrechen. Man kann durch zartes Abpinseln das ganze Gebilde vom Pigment befreien. Wenn man ein solches Präparat auf den durchlöcherten Objectträger bringt und behandelt, wie ich dies oben bei der Käfercornea beschrieben habe (nur ist der Zartheit des Objectes wegen das Deckgläschen durch ein feines Glimmerplättchen zu ersetzen) und stellt dann das Mikroskop auf die Spitze der Krystallkegel ein, so sieht man die ganze Cornea schwarz und durchsäet von sehr hellen Punkten. Jeder Punkt entspricht einem Krystallkegel. Von einem Bildchen ist keine Spur.

Stellt man höher oder tiefer ein, so geht jeder helle Punkt in einen Zerstreuungkreis auseinander.

Das Schwarz zwischen den Punkten ist so vollkommen, dass man versucht ist, immer wieder Pigment zwischen den Zapfen anzunehmen; fertigt man aber aus dem untersuchten Präparat Schnitte an, die man in Profil legt, so erkennt man sogleich, dass kein Pigment da ist, legt man einen solchen Schnitt wieder um, so hat man das alte Bild. Es ist also kein Zweifel: die optischen Apparate entwerfen kein Bildchen, sondern vereinigen nur die Strahlen an der Spitze des Krystallkegels. Die totale Reflexion in diesen ist so vollkommen, dass keine merkliche Lichtmenge durch den Apparat dringt, ausser an der Spitze der Krystallkegel.

Suspendirt man das präparirte Auge in Wasser und gibt ein Deckgläschen darauf, so ändert sich das Bild. Man hat keine so scharfen Punkte mehr, man kann sogar auf ein verzerrtes sehr kleines Bildchen einstellen. Dieses Bildchen liegt gelegentlich aber nicht in der Spitze des Krystallkegels, sondern jenseits ihrer Basis, also in der Cornea oder sogar vor

[1] Es hatte dieses Verhalten zuerst Leidig bei *Elater noctilucus* und *Cantharis melanura* gefunden. Müller's Archiv, 1855.

derselben, und warnt also, wie vorsichtig man mit der Deutung solcher Bildchen sein muss. Wie es entsteht, kann ich nicht angeben. Übrigens wechselt, wie zu erwarten ist, in diesem Falle je nach Druck des Deckgläschens, Lage des Objectes etc. der optische Effect der Krystallkegel in hohem Grade.

Man bekommt auch Andeutungen vom Bilde des Fensterkreuzes an der Spitze des Kegels, doch ist dies dann kein eigentliches Bild, wie man daraus ersehen kann, dass es bei sehr verschiedener Einstellung nicht wesentlich verschiedene Deutlichkeit hat.

Sowohl aus der Anatomie des Facettenauges, als auch aus der optischen Untersuchung desselben scheint mir hervorzugehen, dass es in erster Linie dazu geeignet ist, Strahlen, welche aus einer gewissen Richtung kommen, an der Spitze des Krystallkegels zu vereinigen (s. die Abbildung). Es geschieht dies theils durch Brechung hauptsächlich an der vorderen und hinteren Corneafläche, theils durch totale Reflexion im Innern des Krystallkegels, in welchem das Licht, das durch die Cornea der Axe desselben zugebrochen wurde, gleichsam gefangen ist, sowie dies Prof. E. Brücke[1] für die Stäbchen der Säugethierretina nachgewiesen hat.

Die einfallenden Strahlen, deren Richtung zu sehr von der Axe des Auges abweicht, erfahren bei verschiedenen Thieren verschiedenes Schicksal. Entweder sie werden von dem Pigment absorbirt, welches zwischen den einzelnen Hornhautfacetten liegt (in der Abbildung der Strahl *mn*) oder sie werden an einer Einschnürung am oberen Ende des Krystallkegels, welche Max Schultze mit einer Iris vergleicht, durch Reflexion entfernt (s. die Abbildungen Max Schultze's von der Krabbe), oder sie werden, wie dies bei *Hydrophilus* der Fall ist, auf folgende Weise beseitigt: Das obere Ende des Krystallkegels ist 0·016 Mm. breit, während die hintere Hornhautfläche eine Basis von 0·025 Mm. hat. Der Kegel sitzt also nur dem Scheitel dieser Fläche auf. Da, wo diese vom Krystallkegel frei ist, dringen die schief auffallenden Strahlen aus dem optischen Apparat wie-

---

[1] Müller's Archiv, 1844.

der heraus und werden hier von dem reichlichen Pigment vernichtet (pq).

Betrachten wir noch einmal das zusammengesetzte Auge in toto, indem wir zu unserem ursprünglichen Beispiele zurückkehren. Es sieht die Kerzenflamme ziemlich localisirt durch seine Eintheilung in Facetten, es wird aber doch in einer beträchtlichen Anzahl von Einzelaugen Empfindung erregt, welche Empfindung erhöht ist durch die Lichtcondensatoren. Es ist kein Zweifel, dass das Licht der Kerzenflamme im zusammengesetzten Auge einen weit grösseren Bruchtheil sämmtlicher Nervenendigungen erregt, als im menschlichen Auge.

Dadurch aber ist es im Vortheil beim Sehen von Bewegungen: führe ich die Kerzenflamme bis zu einem gewissen Punkte weiter, so haben im Facettenauge relativ mehr Nervenendigungen ihre Erregung verloren und sind relativ mehr in Erregung versetzt worden, als im Auge des Wirbelthieres. Der Effect, der die Aufmerksamkeit auf sich ziehen soll, wird also im ersten Falle ein grösserer sein. So ist es wenigstens bei uns. Man bewege einen grossen Papierbogen im indirecten Sehen um einen Centimeter hin und her, und thue dasselbe mit einem Papierschnitzelchen, das man an die centralste Stelle des Sehfeldes bringt, welche der Papierbogen eingenommen hat. Man wird finden, dass die Bewegung des Papierbogens weit auffallender war, als die des Schnitzelchens. Einen Käfer, der durch das Gesichtsfeld fliegt, übersieht man leichter als einen Vogel, und einen kleinen Vogel wieder leichter als einen grossen.

Man könnte nun noch sagen, dass die im menschlichen Auge durch das Licht der Flamme erregten Nervenenden vom vollen Licht erregt sind, während im Facettenauge der grösste Theil, vielleicht sogar sämmtliche, die überhaupt erregt werden, je nach der Winkelgrösse der Flamme, nicht vom vollen Lichte getroffen werden. Auf das Retinaelement gelangen nur Strahlen, welche von der Flamme ausgehen, auf das Facettenelement gelangen ausser diesen Strahlen noch eine Menge anderer, welche von der Umgebung der Flamme ausgehen — die Umgebung als heller Hintergrund gedacht.

Es wird also die Erregungsintensität, welche die Kerzenflamme hervorruft, im einzelnen Facettenelemente geringer sein als im Retinaelemente — so weit sich Erregungen an verschiedenen Organen verschiedener Thiere überhaupt vergleichen lassen. Diese geringere Erregung, könnte man sagen, mache meine ganze Deduction illusorisch.

Diesen Einwand weise ich zurück mit dem in meiner anfangs genannten Arbeit gelieferten Nachweis, dass die Genauigkeit, mit welcher wir die Bewegung eines hellen Kreises sehen, innerhalb weiter Grenzen unabhängig ist von dem Grade der Helligkeit desselben. So ist es beim Menschen; es scheint mir kein Grund vorhanden, anzunehmen, dass es bei den Thieren mit Facettenaugen anders sei.

Aber mehr noch als die eben genannten Umstände möchte beim Facettenauge als Bewegung empfindender Apparat der eingangs angedeutete Umstand in Betracht kommen, demzufolge die Erregung, welche die Kerzenflamme in den Einzelaugen hervorruft, am grössten ist im Centrum des erregten Facettenbezirkes, und von diesem aus nach concentrischen Kreisen abnimmt. Macht die Kerze eine minimale Bewegung, so dass sich das Centrum z. B. um eine Facette nach rechts verschiebt, so verschiebt sich die Erregung jedes Einzelauges ebenfalls um eine Facette nach rechts, so dass jetzt jedes Einzelauge so stark erregt ist, wie bei der ersten Flammenstellung sein Nachbar zur linken Seite erregt war. Es tritt also eine Bewegungsempfindung streng genommen zwischen je zwei benachbarten Einzelaugen auf.

Was eine solche Vervielfältigung der Empfindung wirken muss, kann man sich gerade am Facettenauge anschaulich machen: wenn man ein Präparat der Cornea vor sich hat, welches die Bildchen der Fenster gut zeigt, und man bringt dann noch den Finger vor den Spiegel des Mikroskopes, so dass dessen Bild im Bilde des Fensters liegt und man macht geringe Bewegungen mit dem Finger, so sieht man ein höchst auffallendes Wogen durch das ganze Präparat. Dieselbe Bewegung in einer einzigen Facette würde man kaum bemerken.

Wie man sieht, bin ich mit meinen Ansichten über die Function des Facettenauges auf die Theorie von Joh. Müller[1] zurückgekommen, nach welcher im zusammengesetzten Auge ein aufrechtes mosaikartiges Bild der Gegenstände entsteht. Sie hatte immer den grossen Vorzug der Einfachheit vor der anderen Theorie voraus, nach welcher jene grosse Menge von Bildchen als solche die Wahrnehmung vermitteln sollten. In der That muss man eine ganze Reihe von Hypothesen aufstellen, wenn man sich eine Vorstellung bilden will über die Art, wie nach dieser eine Raumanschauung zu Stande kommen soll. Ich erinnere nur daran, dass das Müller'sche Bild immer noch in seinen Hauptzügen bestehen bleibt, trotz aller verkehrten Facettenbildchen. Ich erinnere an die enorme Kleinheit der empfindenden Elemente, die man voraussetzt, wenn man das Facettenbild mit dem Netzhautbild vergleicht. Wenn man bedenkt, dass jedes Fetttröpfchen unter dem Mikroskop ein Bildchen des Fensterkreuzes entwirft, so kann man es nicht für einen glücklichen Griff halten, blos auf die Entdeckung eines ähnlichen Bildchens hin jene Theorie verlassen zu haben. Es gebührt Boll das Verdienst, der erste gewesen zu sein, welcher aufforderte, auf den Weg Joh. Müller's zurückzukehren.

Meine Auffassung unterscheidet sich von der alten dadurch, dass ich ein Hauptgewicht auf das Sehen der Bewegungen lege; ich glaube gezeigt zu haben, dass die Unvollkommenheit der räumlichen Auffassung des Facettenauges ersetzt wird durch die Vollkommenheit in der Auffassung von Bewegungen.

---

[1] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtsinnes. Leipzig, 1826.

ANHANG.

Der Brechungsexponent der Cornea n_2 lässt sich bestimmen aus den Formeln: [1]

$$F_2 = \frac{n_2 n_3 r_1 r_2}{N}$$

$$h_2 = \frac{n_3(n_1 - n_2) d r_2}{N},$$

worin F_2 die zweite Hauptbrennweite; $n_1\, n_2\, n_3$ die Brechungsindices der brechenden Medien, gerechnet in der Richtung des einfallenden Strahles; $r_1 r_2$ die Krümmungshalbmesser, welche positiv gerechnet sind, wenn die Convexität der Krümmung dem einfallenden Strahle zugekehrt ist; h_2 die Entfernung des zweiten Hauptpunktes des Systemes von der zweiten brechenden Fläche, positiv gerechnet, wenn der zweite Hauptpunkt im Sinne des Strahles hinter der brechenden Fläche liegt; d die Entfernung der brechenden Flächen von einander bedeuten, und

$$N = n_2(n_3 - n_2) r_1 + n_2(n_2 - n_1) r_2 - (n_3 - n_2)(n_2 - n_1) d \text{ ist.}$$

Es ist nämlich nach Messung die Entfernung des Bildchens von der hinteren Hornhautfläche = 0·037 Mm., also

$$\frac{n_2 n_3 r_1 r_2}{N} - \frac{n_3(n_1 - n_2) d r_2}{N} = 0 \cdot 037.$$

Ferner ist der Brechungsexponent der Luft $n_1 =$ 1 gesetzt
der Krümmungsradius der vorderen Fläche . . $r_1 =$ 1·44 Mm.
der Krümmungsradius der hinteren Fläche. . . $r_2 =$ —0·013 Mm.
die Entfernung der brechenden Flächen von einander . . . . $d =$ 0·077 Mm.
der Brechungsexponent des Wassers. . . . . $n_3 =$ 1·336 Mm.

Es ergibt sich $n_2 = 1{\cdot}82$.

---

[1] Ich wähle die Ausdrucksweise aus Helmholtz's „Physiologische Optik“.

Hieraus die erste Hauptbrennweite

$$F_1 = \frac{n_1 n_2 r_1 r_2}{N} = 0\cdot027 \text{ Mm.},$$

die zweite Hauptbrennweite[1]

$$F_2 = \frac{n_2 n_3 r_1 r_2}{N} = 0\cdot036.$$

Die Entfernung des ersten Hauptpunktes von der ersten brechenden Fläche

$$h_1 = \frac{n_1(n_2 - n_3) d r_1}{N} = -0\cdot043 \text{ Mm.}$$

d. h., nach der Wahl der Zeichen um 0·043 Mm. hinter der ersten brechenden Fläche.

Die Entfernung des zweiten Hauptpunktes von der zweiten brechenden Fläche

$$h_2 = \frac{n_3(n_1 - n_2) d r_2}{N} = -0\cdot00087 \text{ Mm.}$$

d. h. 0·00087 Mm. vor der zweiten brechenden Fläche (nach der Richtung der Strahlen gerechnet).

Die Probe auf die Genauigkeit dieser Rechnung lässt sich machen, indem man aus den gefundenen Daten die Grösse des Bildchens berechnet, welches die Cornea von einem gegebenen Gegenstande entwirft und die gefundene Grösse vergleicht mit der unter dem Mikroskope gemessenen Grösse dieses Bildchens

Wenn β_1 die Grösse des Gegenstandes, β_2 die des Bildes und f_1 die Entfernung des Gegenstandes ist, so verhält sich

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{F_1 - f_1}{F_1}.$$

---

[1] Rüte hatte für das Fliegenauge eine Hauptbrennweite von 0·000139 Mm. gefunden, freilich nach Messungen, über deren Correctheit man wegen Mangels an Angaben sich kein Urtheil bilden kann (Festschrift der med. Facultät zu Leipzig, 1861).

Es war

$$\beta_1 = \quad 950 \text{ Mm.}$$

$$f_1 = 4500 \text{ Mm.}$$

also

$$\beta_2 = \quad -0\ 006 \text{ Mm.}$$

Das Minuszeichen bedeutet, dass das Bild umgekehrt ist.

Das gemessene β_2 betrug 0·007 Mm. Der Unterschied liegt noch im Bereiche der Fehlergrenzen der Messung.

Die Bestimmung der Lage der Bilder für den Fall, dass die ganze Cornea in Glycerin liegt, geschah auf folgende Weise: Da die Cornea mit ihrer convexen Fläche auf dem Objectträger liegt, und diese einen relativ grossen Krümmungsradius hat, so kann man die Glycerinschichte zwischen Objectträger und Cornea vernachlässigen nach dem Satze, welcher sagt, dass eine unendlich dünne Schichte auf den Gang der Strahlen keinen Einfluss hat. Wenn wir noch für das Glas den Brechungsindex annehmen, welchen die Cornea hat (und dieser liegt innerhalb der Werthe, welche der Brechungsindex des Glases haben kann), so können wir das optische System als nur von zwei Flächen gebildet ansehen, einer vorderen ebenen, und einer hinteren vom bekantem r. Die erstere bewirkt für die zweite eine Verschiebung des Gegenstandes. Es ist

$$f_2 = -\frac{n_2}{n_1} f_1,$$

worin $n_2 = 1{\cdot}82$, $n_1 = 1$ und $f_1 = 4500$ ist. Also

$$f_2 = -8190.$$

Das Minuszeichen sagt, dass das Bild auf der Seite des Gegenstandes liegt, also eben nur eine Verschiebung gegen diesen erhalten hat.

Die Brechung an der hinteren Fläche wird ausgedrückt durch

$$\frac{n_1}{f_1} + \frac{n_2}{f_2} = \frac{n_2 - n_1}{r},$$

worin

$$n_1 = 1{\cdot}82$$

$$n_2 = 1{\cdot}47 \text{ (Glycerin)}$$

$$f_1 = 8190$$
$$r = -0 \cdot 013.$$

Es folgt

$$f_2 = 0 \cdot 055 \text{ Mm.}$$

Für den im Texte angeführten Fall, dass der Krystallkegel der Hornhaut unmittelbar aufsitzt und denselben Brechungsindex hat wie diese, kommt nur die Brechung an der vorderen Hornhautfläche in Betracht, und lässt sich die Entfernung des Bildes aus derselben Gleichung

$$\frac{n_1}{f_1} + \frac{n_2}{f_2} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

berechnen.

Es ist dann

$$n_1 = 1$$
$$n_2 = 1 \cdot 82$$
$$r = 1 \cdot 44$$
$$f_1 = 4500 \text{ Mm.},$$

woraus sich ergibt

$$f_2 = 3 \cdot 2 \text{ Mm.}$$

Die sämmtlichen Rechnungen beziehen sich auf einen speciellen Fall, in welchem die verwendeten Masse gefunden wurden.

Erklärung der Abbildung.

Fünf Corneafacetten von *Hydrophilus piceus*. An dreien derselben hängen die Krystallkegel. Die Masse sind genau nach der Natur; die Abbildung 500mal vergrössert.

Das Facettenauge I zeigt, wie die von einem Punkte ausgehenden Strahlen durch die Corneafacette so zusammengebrochen werden, dass sie sich, wenn der Krystallkegel nicht da wäre, im Punkte *o* vereinigten. Ist der Krystallkegel aber in seiner natürlichen Lage, so werden die Strahlen weniger stark der Axe zugebrochen, und werden durch totale Reflexion im Innern des Krystallkegels der Spitze desselben zugeführt.

Facettenauge II zeigt, wie und wo das Bild eines Gegenstandes entstehen würde, wenn die Strahlen nur die Corneafacette zu passiren hätten, und wie das Zustandekommen des Bildes unmöglich wird, wenn der Krystallkegel seine natürliche Lage einnimmt. Der Strahl *mn* dient als Beispiel eines Strahles, der so schief einfällt, dass er durch das bei den meisten Thieren zwischen den Corneafacetten liegende Pigment absorbirt wird. Der Strahl *pq* gelangt auch ins Pigment, wo er absorbirt wird.

Facettenauge III zeigt die Gestalt der brechenden Medien.

Corneafacette IV zeigt die Lage der Brennpunkte (f_1 f_2), der Hauptpunkte (h_1, h_2) und der Knotenpunkte (k_1, k_2) einer Hornhautfacette für den Fall, dass ihre vordere Fläche an Luft, ihre hintere Fläche an Wasser grenzt.

Gez. v. Verf. Lith v Schi…

k.k. Hof- u. Staatsdruckerei